

HIDRAULINIO SMŪGIO TYRIMAI TINKLUOSE

Anželika JURKIENĖ¹, Mindaugas RIMEIKA²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva
El. paštas: ¹anzelika.jurkiene@vgtu.lt; ²mindaugas.rimeika@vgtu.lt

Santrauka. Hidraulinio smūgio susidarymas, jo padariniai ir galimos apsaugos priemonės yra retai nagrinėjama tema, tačiau ši problema yra labai aktuali. Hidraulinis smūgis gali susidaryti tiek vandentiekio, tiek slėginiuose nuotekų tinkluose. Straipsnyje pateikiami hidraulinio smūgio teoriniai pagrindai bei būdingų parametrų apskaičiavimo metodika. Hidraulinio smūgio tyrimai buvo atliekami šalies vandentiekio ir nuotekų tinkluose, įjungiant ir išjungiant siurblius. Hidraulinis smūgis buvo matuotas ypač aukštos rezoliucijos slėgio matuokliais. Didžiausi slėgio bangos svyravimai užfiksuoti siurblinėse, išjungiant siurblius. Detalesnei hidraulinio smūgio analizei bei apsauginei įrangai parinkti buvo sudarytas hidraulinis vandentiekio tinklo modelis. Parinktos optimalios tinklo apsaugos priemonės, užtikrinančios efektyvų slėgio bangos slopinimą. Apsauga nuo hidraulinio smūgio padeda išvengti tinklo ardymo bei prailgina tinklo tarnavimo laiką.

Reikšminiai žodžiai: hidraulinis smūgis, slėgio banga, slėgio pokytis, hidraulinis modeliavimas.

Įvadas

Pagal hidraulikos dėsnius nenusistovėjęs skysčio tekėjimas atsiranda tada, kai kiekviename skysčio taške laikui bėgant greičio dydis ir kryptis kinta (Kay 2008; Ellis 2008). Toks nenusistovėjęs vandens tekėjimas yra dažnas tiek vandentiekio, tiek slėginiuose nuotekų tinkluose. Dažniausiai jį sukelia šios priežastys:

- elektros energijos dingimas;
- siurblio paleidimas ar sustabdymas;
- staigus tinkle esančios sklendės uždarymas;
- gaisrinių hidrantų naudojimas;
- vamzdyno pildymas ar ištuštinimas;
- vamzdyne atsiradęs oras.

Staigiai keičiantis vandens greičiui, vandentiekio tinkle atsiranda slėgio svyravimai, galintys suardyti vamzdžių sienelės. Staigus slėgio padidėjimas arba sumažėjimas vamzdyje, kai staigiai kinta skysčio tekėjimo greitis, vadinamas hidrauliniu smūgiu (Wichowski 2006).

Hidraulinis smūgis būna teigiamas arba neigiamas (Pothof, Karney 2012). Pavyzdžiui, uždaran sklendę, iš inercijos skystis dar kurį laiką teka link sklendės, čia jis tarsi „susispaudžia“, o slėgis staiga padidėja: gaunamas teigiamas hidraulinis smūgis. Šiuo atveju papildomas slėgis gali daug kartų viršyti pradinį slėgį vamzdyje arba sistemoje. Dėl to gali įvykti avarijos: sutrūkti vamzdžiai, sugesti sistemos hidrauliniai aparatai bei prietaisai. Staiga paleidus skystį tekėti vamzdžiu, pavyzdžiui, atidarius sklen-

dę, gaunamas neigiamas hidraulinis smūgis. Šiuo atveju sistemoje dėl staigus slėgio sumažėjimo gali susidaryti didelis vakuumas ir pasireikšti žalingi kavitacijos reiškiniai (Ludecke, Kothe 2006).

Hidraulinis smūgis yra kasdienė tinklų eksploatavimo problema, tačiau moksliniu požiūriu tai retai nagrinėjama tema.

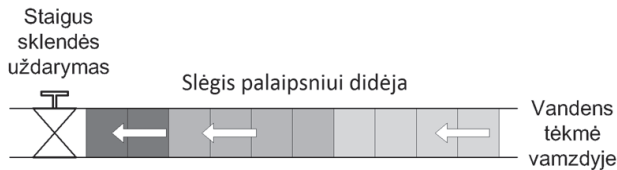
Hidraulinio smūgio teoriniai pagrindai

Hidraulinio smūgio rezultatas yra staigus slėgio padidėjimas kliūties vietoje ir atsiradusios slėgio bangos staigus sklidimas išilgai vamzdžio. Dėl savo staigumo ši banga dar vadinama smūgine arba smūgio banga (Kay 2008). Slėgio banga sklinda dvejomis kryptimis. Kai tik banga pasiekia vamzdyno pabaigą, ji grįžta atgal ir sklinda kliūties link. Šis cikliškas bangos judėjimas vamzdžiu pirmyn ir atgal gali trukti kelias minutes tol, kol dėl trinties slėgis sumažėja iki normalaus, o banga galiausiai sustoja. 1 pav. pateikiama principinė hidraulinio smūgio susidarymo schema.

Laikas, per kurį slėgio banga nukeliauja iki kliūties (pvz., sklendės) ir grįžta atgal, apskaičiuojama pagal formulę (Ellis 2008; Savic, Banyard 2011):

$$T_f = \frac{2L}{c}, \quad (1)$$

čia L – vamzdžio ilgis (m); c – hidraulinio smūgio bangos sklidimo greitis (m/s).



1 pav. Hidraulinio smūgio susidarymas vamzdyje
Fig. 1. Formation of water hammer in pipe

Slėgio padidėjimas hidraulinio smūgio metu priklauso nuo to, ar greitai vanduo tekėjo vamzdžiu ir ar greitai buvo uždaryta sklendė. Tačiau, priešingai negu yra dažnai manoma, slėgio padidėjimas hidraulinio smūgio metu visiškai nepriklauso nuo tinkle palaikomo slėgio (Kay 2008). Pagrindiniai hidraulinio smūgio parametrai yra du: slėgio padidėjimas Δp ir smūgio bangos sklidimo greitis c (Ellis 2008).

Slėgio pokytis gali būti apskaičiuotas pagal Nikolajaus Žukovskio 1989 metais (Nikoláj Egórovich Zhukóvskij 1847–1921) atrastą formulę (Ludecke, Kothe 2006; Pothof, Karney 2012; Savic, Banyard 2011; Tijsseling, Anderson 2006):

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot \Delta v \quad [\text{N/m}^2], \quad (2)$$

čia Δp – slėgio pokytis, vamzdyne pasikeitus vidutiniam tėkmės greičiui, (N/m^2); ρ – vamzdynu tekančio skysčio tankis (vandens 1000 kg/m^3), (kg/m^3); c – hidraulinio smūgio bangos greitis išilgai vamzdžio, (m/s); Δv – vandens tekėjimo greičio sumažėjimas: $\Delta v = v_1 - v_2$ (m/s); v_1 – skysčio tekėjimo greitis vandenyje iki kliūtis atsiradimo.

Esant absoliučiam vamzdžio sienelių standumui, smūgio bangos greitis c lygus garso greičiui skystyje, tai yra, nuo 600 iki 1400 m/s , ir yra apskaičiuojamas pagal formulę (Ludecke, Kothe 2006; Pothof, Karney 2012; Savic, Banyard 2011; Tijsseling, Anderson 2006):

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{C_1 \cdot D}{e \cdot E} + \frac{1}{K} \right)}}, \quad (3)$$

čia: c – hidraulinio smūgio bangos greitis išilgai vamzdžio, (m/s); ρ – vamzdynu tekančio skysčio tankis (vandens 1000 kg/m^3), (kg/m^3); C_1 – koeficientas, priklausantis nuo vamzdžio tvirtumo; E – vamzdžio elastingumo modulis, (N/m^2); e – vamzdžio sienutės storis, (m); D – vamzdžio skersmuo, (m); K – vandens elastingumo modulis, (N/m^2).

Greitis priklauso ir nuo vamzdžio skersmens bei medžiagos, nes vienos medžiagos energijos virpesius absorbuoja geriau negu kitos (Covas *et al.* 2004; Wichowski 2006).

Slėgio aukščio pokytis gali būti apskaičiuojamas pagal šią formulę (Kay 2008; Ludecke, Kothe 2006):

$$\Delta h = \frac{c v}{g}, \quad (4)$$

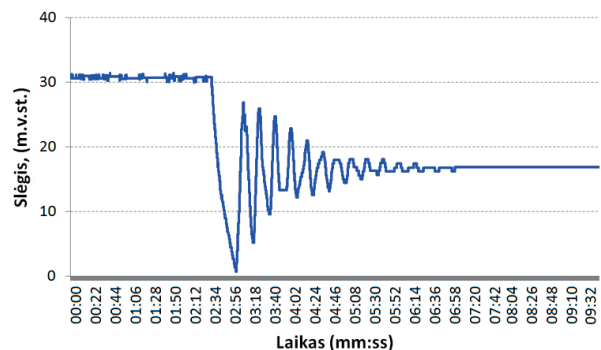
čia: Δh – slėgio aukščio pokytis (m.v.st. – vandens stulpo metrai); c – hidraulinio smūgio bangos greitis (m/s); v – vandens tėkmės greitis (m/s); g – gravitacijos konstanta ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Pavyzdžiui, jeigu vanduo vamzdžiu teka vidutiniškai 1 m/s greičiu, o smūgio bangos greitis yra 1200 m/s , tada teorinė hidraulinio smūgio vertė būtų 122 m.v.st. Jeigu lauko vandentiekyje yra palaikomas 60 m slėgis, tuomet hidraulinio smūgio metu jis padidėja net tris kartus. Tokiomis sąlygomis smūgio banga per 8 sekundes nukeliauja 10 kilometrų atstumą vamzdžiais ir per 16 sekundžių grįžta iki smūgio susidarymo vietos. Šis pavyzdys, žinoma, yra tik preliminarus, nes sklendę akimirksniu užsukti nėra įmanoma, be to, yra klaidinga manyti, kad vamzdžiai yra visiškai standūs (Covas *et al.* 2004). Visos medžiagos pasiduoda tempimo jėgoms, todėl vamzdžiai absorbuoja slėgio energiją prasitempdami. Visi šie faktoriai šiek tiek sušvelnina slėgio pokyčius, tačiau visiškai jų nesustabdo.

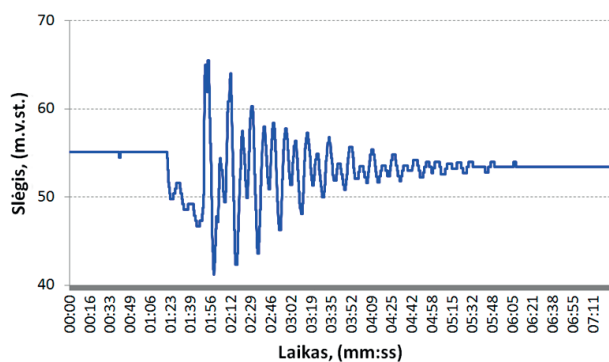
Vamzdynu judanti slėgio banga sukelia slėgio svyravimus, kurie tolygiai mažėja po kelių bangos grįžimo ciklų, t. y. slėgis matavimo taške cikliškaai padidėja ir sumažėja. 2 pav. pateiktas tipinis slėgio svyravimo grafikas staiga išjungus siurbli. Pradinis slėgis normaliai dirbant siurbliui buvo apie 31 m.v.st. Išjungus siurbli, jis nukrenta iki 0 m.v.st. , ir po truputį silpstant smūgio bangai nusistovi iki 17 m.v.st. , t. y. iki geometrinio aukščio. Reikia atkreipti dėmesį, kad grafike parodyta, kad slėgio svyravimas išjungus siurbli truko apie 3 sekundes.

Tokie slėgio svyravimai yra ne kas kita, kaip hidrauliniai smūgiai, susidarantys tinkluose ir darantys neigiamą įtaką vamzdynui. 3 pav. pateikiami slėgio bangos svyravimai nuotekų tinkle.

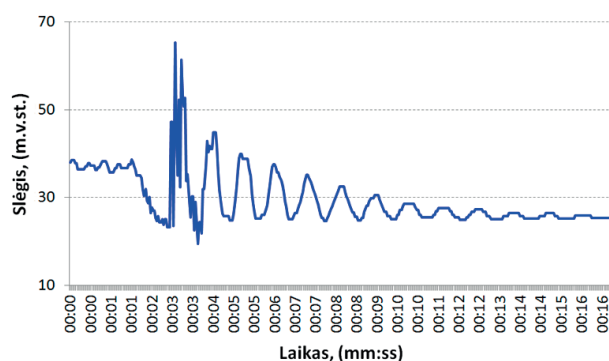
Pateiktame pavyzdyje matyti, kaip per trumpą laiką slėgis pasikeičia labai stipriai. Tik įvykus hidrauliniams smūgiui per 4 sekundes slėgis pakinta nuo 66 m.v.st. iki 41 m.v.st. , taigi slėgio skirtumas yra 25 m.v.st.



2 pav. Slėgio svyravimas išjungus siurbli
Fig. 2. Pressure fluctuation after the pump switching off



3 pav. Slėgio svyravimai nuotekų tinkle, išjungus siurbli
Fig. 3. Pressure fluctuation in sewage network after pump switching off



4 pav. Slėgio svyravimai siurblinėje, išjungus siurbli
Fig. 4. Pressure fluctuation at station after pump switching off

4 pav. pavaizduotas dar vienas slėgio pasikeitimo pavyzdys. Atliekant slėgio matavimus nuotekų tinkle po siurblio išjungimo buvo užfiksuotas slėgio pasikeitimas nuo 65 m. v. st. iki 20 m. v. st. tik per 0,5 sekundės, slėgio skirtumas buvo net 45 m. v. st. Nuotekų siurblinėse siurbliai paprastai įsijungia / išsijungia apie 20–40 kartų per parą. Nesunku įvertinti, kad kasmet toks vamzdyno plėšymas įvyksta apie dešimt tūkstančių kartų. Slėgio pokyčiai iš-tampo vamzdyną, ir jis anksčiau ar vėliau lūžta.

Kaip matyti iš matavimo duomenų, po siurblių iš-jungimo susidaranti hidraulinio smūgio banga daro didelį poveikį vamzdynui, tad norint ją sumažinti reikia imtis tinkamų inžinerinių sprendimų. Vienas iš veiksmingiausių sprendimų – lėtas vandens judėjimas vandentiekio ir nuotekų tinkluose, nes atsiradusią kliūtį veikia mažesnės jėgos (Davis 2004). Dėl šios priežasties vandentiekio tinklai yra projektuojami tekinti vandenį ne didesniu negu 1,6 m/s greičiu. Taip pat, kai sklendės yra užsukamos palaipsniui, vanduo sustoja palaipsniui ir atsirandantis padidėjęs slėgis tinklui nepadaro didelės žalos. Tačiau tai yra tik pasyvi apsauga nuo hidraulinio smūgio. Egzistuoja ir speciali inžinerinė įranga, skirta hidraulinio smūgio bangai sušvelninti.

Tyrimų metodika

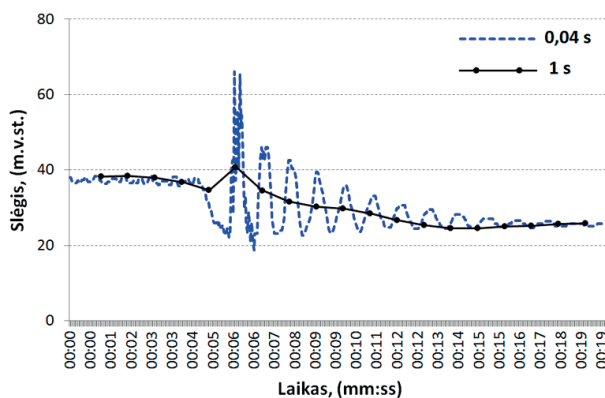
Hidraulinio smūgio tyrimams pasirinktas tipinio Lietuvos miesto vandentiekio tinklas. Mieste yra gyvenamųjų namų ir keletas pramonės įmonių bei viešosios paskirties pastatų. Tyrimams pasirinktos miesto vandentiekio tinklo dalies ilgis yra 113 km. Tinklo vamzdynai yra pagaminti iš ketaus, plieno bei polietileno. Vanduo iš vandenvietės į vandentiekio tinklą yra tiekiamas antro pakėlimo siurbliais, tinkle taip pat yra du švaraus vandens rezervuarai.

Tyrimų metu vandentiekio tinkle buvo įrengti matavimo taškai bei atlikti slėgio ir debito matavimai, tinklui veikiant įprastai, bei slėgio matavimai hidraulinio smūgio metu. Hidraulinis smūgis vandentiekio tinkle buvo sukeltas tyrimo tikslais, iš pradžių vandentiekio siurblinėje staigiai įjungus siurblius, paskui staigiai išjungus siurblius. Matuojama buvo dviejų tipų slėgio matuokliais. Jų parametrai aprašyti 1-oje lentelėje:

1 lentelė. Matavimams naudotų slėgio matuoklių parametrai
Table 1. Parameters of pressure meters used for the measurements

| Slėgis | iki 35 bar | iki 21 bar |
|-------------------|----------------------|-----------------------|
| Rezoliucija | iki 25 kartų/sekundę | iki 100 kartų/sekundę |
| Matavimų atmintis | 8 mln. matavimų | 0,3 mln. matavimų |

Matavimo dažnumas yra esminis veiksnys, lemiantis, ar hidraulinis smūgis iš viso bus išmatuotas. Didžioji dalis šalyje naudojamų slėgio matavimo prietaisų yra netinkami staigiems slėgio pokyčiams matuoti. Hidraulinis smūgis turi būti matuojamas ypač tiksliai (Choi *et al.* 2015). 5 pav. pateikiamas slėgio grafikas. Kai duomenys fiksuojami kas 0,04 sek. (25 kartai per 1 sek.), matomi ryškūs slėgio svyravimai. Kai duomenys fiksuojami kas 1 sek., svyravimų nebelieka ir gaunama nuožulni linija, kuria remiantis galima



5 pav. Hidraulinio smūgio matavimo duomenys, pateikti kas 0,04 sekundės ir suapvalinti kas 1 sekundę

Fig. 5. Surge wave measurement results presented each 0,04 second and rounded down each 1 second

teigti, kad hidraulinis smūgis visai neįvyko. Su šia problema, kai hidraulinis smūgis įvyksta, bet matavimo įranga jo neišmatuoja, susiduria daugybė inžinierių, eksploatuojančių vandentiekio ir nuotekų tinklus. Tai trukdo priimti teisingus sprendimus ir tinkamai eksploatuoti tinklą.

Tyrimo metu vandentiekio tinkle buvo atlikta hidraulinio smūgio imitacija. Hidraulinio smūgio matavimai atlikti šešiuose tiriamo vandentiekio tinklo taškuose.

Hidraulinio smūgio imitacija buvo vykdoma analogiškai kaip ir nutrūkus elektros energijos tiekimui. Siurblys įjungiamas ir išjungiamas tiesiogiai iš elektros tinklo, t. y. elektros įjungimas ir išjungimas buvo momentinis, be jokių uždelimų, be lėto paleidimo ar kitokių elektros apsaugos priemonių. Pradedant bandymą, siurblys nedirbo, įjungus siurblių, jis dirbo 5 min. Po 5 min veikimo siurblys buvo išjungtas. Įjungiant siurblių, buvo atidaryta sklendė po siurblio.

Siekiant dar tiksliau išanalizuoti slėgio pokyčius bei parinkti tinkamiausias priemones hidrauliniam smūgiui mažinti, buvo sukurtas hidraulinis tiriamojo tinklo modelis, naudojant programinę įrangą. Į modelį buvo įtraukti visi vamzdžiai, kurių skersmuo buvo didesnis už 100 mm. Modelis taip pat apėmė vandentiekio siurblinę, vandens rezervuarus, į modelį taip pat buvo įtraukti visi prie tiriamos tinklo dalies prijungti vandens vartotojai.

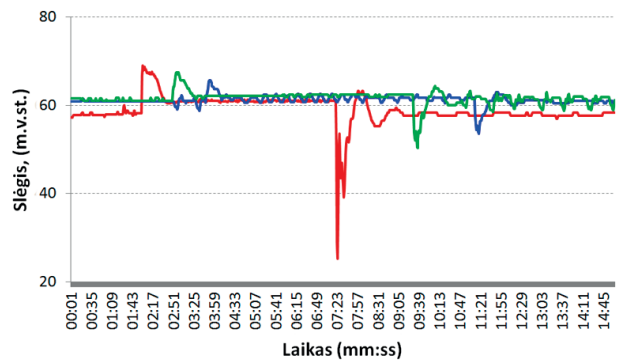
Atlikus debito ir slėgio matavimus tiriamame tinkle, veikiančiame įprastu eksploatavimo režimu, matavimo duomenys buvo įkelti į hidraulinį modelį bei atliktas modelio kalibravimas. Kalibravimas atliekamas tam, kad tinklo modelis kuo labiau atitiktų realaus tinklo parametrus (Marchis *et al.* 2010). Kai modelis buvo parengtas ir sukalibruotas, buvo patikrintos kelios apsaugos priemonės hidrauliniam smūgiui sušvelninti. Į tinklo modelį buvo įterptos šios priemonės:

- Atbuliniai vožtuvai;
- Oro vožtuvai;
- Viršslėgio mažinimo vožtuvai;
- Siurblio darbo valdymo vožtuvai;
- Hidropneumatinis rezervuaras.

Atlikus modeliavimo darbus, parinkta efektyviausia priemonė hidrauliniam smūgiui slopinti.

Rezultatų apibendrinimas

Atlikus hidraulinio smūgio imitaciją, slėgio pokyčiai buvo užfiksuoti matavimo duomenų grafikuose. 6 pav. pateikti trijų matavimo taškų duomenys. Grafikuose matyti slėgio padidėjimas staiga įjungus siurblių. Kai slėgis nusistovi, siurblys yra staigiai išjungiamas, o slėgis staigiai krenta. Didžiausias slėgio pokytis yra išmatuotas siurblinėje siurblio stabdymo metu, stebimas ryškus slėgio sumažėjimas



6 pav. Hidraulinio smūgio bangos svyravimai matavimo taškuose

Fig. 6. Fluctuations of surge wave at the measurement points

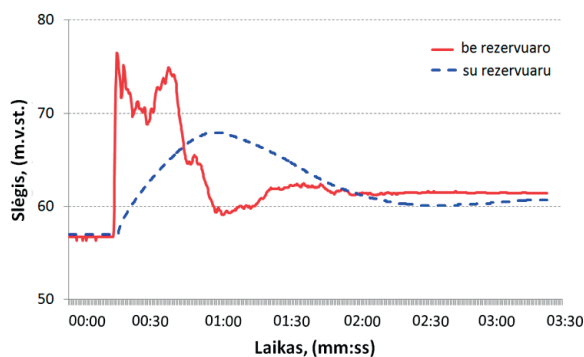
yra 33 m.v.st. Įjungus siurblių, slėgis išaugo nelabai žymiai. Išmatuotas didžiausias slėgio padidėjimas yra 15 m.v.st. Kitos grafiko linijos su mažesniais slėgio svyravimais gautos matavimo taškuose, proporcingai nutolusiuose nuo siurblinės. Akivaizdi ir logiška tendencija yra ta, kad, tolstant nuo hidraulinio smūgio susidarymo vietos – siurblinės, slėgio svyravimai mažėja.

Įjungus siurblių, slėgis staiga pakyla, o siurblinės matavimo taške jis nusistovi maždaug per 42 sekundes. Tačiau, išjungus siurblių, hidraulinio smūgio bangos nusistovėjimas vyksta ilgiau. Siurblinėje išjungus siurblių slėgis nusistovi maždaug per 2 minutes. Kituose matavimo taškuose tendencija yra tokia pati: kuo didesnis slėgio pokytis, tuo ilgesnis laikas per kurį slėgis nusistovi.

Reikia atkreipti dėmesį, kad gauti parametrai yra taidomi konkrečiai buvusiai situacijai. Pasikeitus situacijai vamzdyne, pvz., jei po avarijos nevisiškai pašalinamas oras, rezultatai ir slėgio svyravimai gali keistis.

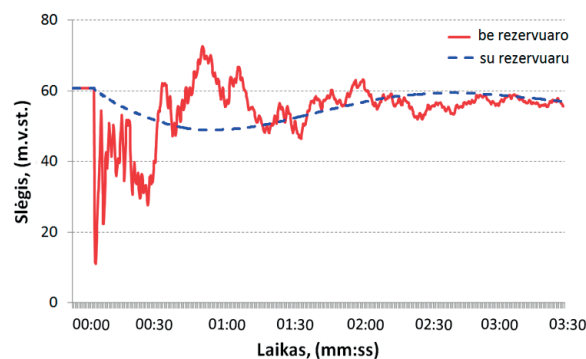
Šie slėgio svyravimai daro neigiamą įtaką vandentiekio tinklui: vamzdyną nuolat veikia jėgos, silpninančios vamzdžio sienelių tvirtumą, ir galiausiai vamzdynas gali sutrūkti. Norint to išvengti, reikia imtis priemonių, padedančių sušvelninti hidraulinio smūgio bangos svyravimus. Egzistuoja daugybė priemonių, apsaugančių tiek vandentiekio, tiek nuotekų tinklus nuo hidraulinio smūgio padarinių, tačiau gana sunku pasakyti, kuri priemonė bus tinkamiausia vienu ar kitu konkrečiu atveju. Vienas iš būdų parinkti efektyviausią hidraulinio smūgio slopinimo priemonę yra modeliavimas. Sudarant hidraulinį tinklo modelį ir kiek įmanoma labiau priartinus jį prie realaus tinklo parametrų, yra galimybė parinkti vieną ar kelias priemones, padedančias sėkmingai valdyti tinkle įvykstančius slėgio pokyčius, ir taip prailginti tinklo tarnavimo laiką.

Tyrimo metu, naudojant tinklo hidraulinį modelį, buvo išbandytos pagrindinės slėgio mažinimo kritiniuose taškuose priemonės, tačiau geriausias rezultatas buvo pasiek-



7 pav. Siurblio paleidimo modeliavimo rezultatai be apsaugos nuo hidraulinio smūgio ir su 30 m³ hidropneumatinio rezervuaru

Fig. 7. Pump start modelling results with no protection of water hammer and with 30 m³ hydropneumatic tank



8 pav. Siurblio stabdymo modeliavimo rezultatai be apsaugos nuo hidraulinio smūgio ir su 30 m³ hidropneumatinio rezervuaru

Fig. 8. Pump braking modelling results with no protection of water hammer and with 30 m³ hydropneumatic tank

tas naudojant hidropneumatinį rezervuarą (dar vadinamą hidroforu). Tai didelė talpa, kurioje yra suspausto oro ir vandens. Suspaustas oras veikia kaip pagalvė, padidinanti arba sumažinanti slėgį. Hidropneumatinis rezervuaras gali būti su membrana arba be jos – pastaruoju atveju oras tiesiogiai liečiasi su skysčiu. Rezervuaras tinkle montuojamas iš karto už siurblių ir atbulinių vožtuvų. Naudojant šią priemonę, hidrauliniam tinkle modelyje buvo pasiekti geriausi hidraulinio smūgio bangos slopinimo rezultatai. Siekiant parinkti optimalų hidropneumatinio rezervuaro tūrį, buvo atliktas modeliavimas pagal skirtingus siurblio darbo scenarijus (siurblio paleidimas ir siurblio stabdymas), bei skirtingus rezervuaro tūrius. Buvo modeliuojamas 60 m³, 40 m³, 30 m³ ir 20 m³ talpos hidropneumatinis rezervuaras. Palyginus modeliavimų rezultatus, paaiškėjo, kad 30 m³ tūrio rezervuaro visiškai pakanka hidraulinio smūgio bangai nuslopinti. Buvo išbandyti ir didesnio tūrio rezervuarai, tačiau skirtumas nebuvo labai didelis, tad galima teigti, kad konkrečiu atveju tiek ekonomiškai, tiek hidrauliškai 30 m³ talpos rezervuaras yra optimalus sprendimas slopinant hidraulinį smūgį tiriamame tinkle.

Hidropneumatinio rezervuaro parinkimo rezultatai pateikiami 7 ir 8 pav. Grafike parodytos dvi linijos. Viena iš jų atspindi slėgio svyravimus tinkle be jokių hidraulinio smūgio mažinimo priemonių. Kita parodo slėgio svyravimus tinkle, kai jame yra sumodeliuotas 30 m³ hidropneumatinis rezervuaras. Pateikiamuose grafikuose vaizduojami du atvejai – siurblio paleidimą ir siurblio stabdymą.

Kaip matyti iš paveikslų, naudojant tiriamo tinklo modelį buvo parinkta optimali apsauga nuo hidraulinio smūgio, užtikrinanti sklandų slėgio bangos svyravimų sumažėjimą tiek įjungiant, tiek išjungiant siurblių.

Išvados

1. Hidraulinis smūgis slėginiame tinkle susidaro staiga keičiantis skysčio tekėjimo greičiui.
2. Stabdant siurblių susidarantys slėgio bangos svyravimai yra daugiau kaip du kartus didesni negu siurblių paleidžiant.
3. Hidrauliniam smūgiui išmatuoti reikalinga ypač tiksli matavimo įranga, atliekanti ne mažiau kaip 20 matavimų per 1 sekundę.
4. Hidraulinis tinklo modelis yra tinkamas įrankis parinkti efektyvias hidraulinio smūgio apsaugos priemones.
5. Tolstant nuo hidraulinio smūgio susidarymo taško, svyravimai tinkle mažėja. Tačiau, jeigu teritorijos reljefas kalvotas, tai didžiausios slėgio perkryčių vietos gali būti toli nuo siurblių.
6. Slėgis tinkle hidraulinio smūgio metu labai greitai keičiasi. Didžiausi išmatuoti svyravimai: 45 m.v.st. per 0,5 sekundės.

Literatūra

- Covas, D.; Stoianov, I.; Ramos, H.; Graham, N.; Maksimovič, Č.; Butler, D. 2004. Water hammer in pressurized polyethylene pipes: conceptual model and experimental analysis, *Urban Water Journal* 1(2): 177–197. <http://dx.doi.org/10.1080/15730620412331289977>
- Choi, D. Y.; Kim, J.; Lee, D. J.; Kim, D. 2015. Pressure measurements with valve-induced transient flow in water pipelines, *Urban Water Journal* 12(3): 200–206. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2013.832778>
- Davis, A. 2004. Hydraulic transients in transmission and distribution systems, *Urban Water Journal* 1(2): 157–166. <http://dx.doi.org/10.1080/15730620412331289968>
- Ellis, J. 2008. *Pressure transients in water engineering*. London: Thomas Telford Publishing. 540 p.

- Kay, M. 2008. *Practical Hydraulics*. 2nd ed. Taylor & Francis. 260 p.
- Ludecke, H. J.; Kothe, B. 2006. *Water hammer*. KSB know-how, Halle, Germany, 34 p.
- Marchis, M.; Fontanazza, C. M.; Freni, G.; Loggia, G.; Napoli, E.; Notaro, V. 2010. A model of the filling process of an intermittent distribution network, *Urban Water Journal* 7(6): 321–333. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2010.519776>
- Pothof, I.; Karney, B. 2012. *Guidelines for transient analysis in water transmission and distribution systems*. Pothof and Karney, licensee InTech. 22 p. <http://dx.doi.org/10.5772/53944>
- Savic, A.; Banyard, J. K. 2011. *Water Distribution Systems*. ICE Publishing, London, United Kingdom. 342 p. <http://dx.doi.org/10.1680/wds.41127>
- Tijsseling, A. S.; Anderson, A. 2006. *The Joukowsky equation for fluids and solids*. Eindhoven: Technical University of Eindhoven. 11 p.
- Wichowski, R. 2006. Hydraulic Transients Analysis in Pipe Networks by the Method of Characteristics (MOC), *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics* 53(3): 267–291. IBW PAN, ISSN 1231–3726.

WATER HAMMER RESEARCH IN NETWORKS

A. Jurkienė, M. Rimeika

Summary

Formation of water hammer, its consequences and possible protection measures are rarely topics, however the problem is significant. Water hammer can form in water supply and pressurized sewage networks, for various reasons. The article presents short theory of water hammer and methodology for calculation of specific parameters. Research of water hammer was performed in real water supply and sewer networks of country. Simulation of water hammer was carried out by turning on and off water pumps in pumping station. Successful measurement of water hammer depends on accuracy of the measurement equipment, therefore during the research surge wave fluctuations were measured with especially high resolution pressure meters. Detailed analysis of water hammer and selection of protecting equipment hydraulic model of water supply network was created. Protection against water hammer helps to avoid breaking of the water network and extend operation time.

Keywords: water hammer, surge wave, pressure change, hydraulic modeling.